

**MODELO DE COOPERACION PARA EL SECTOR ELECTRICO
ENTRE GENERADORES Y COMERCIALIZADORES**

LUCENY GUZMÁN ACUÑA

Tesis de Grado presentada como
requisito para optar al título
de Magister en Ingeniería Industrial

Dr CARLOS PATERNINA ARBOLEDA.
Director

UNIVERSIDAD DEL NORTE

Barranquilla, 2007

Nota de Aceptación

Dr. Carlos Paternina Arboleda
Director

Contenido

1	Introducción	4
2	Descripción del Problema	6
2.1	Antecedentes	6
2.2	Planteamiento del Problema	7
3	Marco Teórico	8
3.1	Teoría de Juegos	8
3.1.1	Tipos de Juegos	8
3.1.2	Modelos Clásicos de Oligopolio	9
3.2	Estructura del Mercado Eléctrico Colombiano	12
3.2.1	Organos Regulatorio, de Control y de Planeación	12
3.2.2	Organización del Mercado	13
3.2.3	Órganos de Operación y Administración	14
3.2.4	Organos Consultor y Asesores	14
3.2.5	Tipos de Usuario	15
3.3	Programación binivel	17
3.3.1	El problema de la programación binivel	17
3.3.2	Sistema bi nivel descentralizado	19
3.3.3	Características de las soluciones	19
3.3.4	Técnicas de Solución	20
3.4	Estado del Arte	22
4	Diseño del Modelo	27
4.1	Objetivos	27
4.1.1	Objetivo General	27
4.1.2	Objetivos Específicos	27
4.2	Diseño Metodológico	27
4.2.1	Tipo de Estudio	27
4.2.2	Metodología	28
4.3	Descripción del Modelo	29
4.4	Fuentes de Información	30
4.5	Resultados Esperados.	30
4.6	Alcance y Limitaciones	31

5 Solución del Modelo de Optimización	32
6 Conclusiones	38

Capítulo 1

Introducción

El funcionamiento del sector eléctrico colombiano está fundamentado en la Ley 142 de Servicios Públicos Domiciliarios ¹ y la Ley 143 de Energía Eléctrica ², mediante las cuales se crea un mercado mayorista competitivo, con el fin de lograr la eficiencia en la prestación del servicio de electricidad y la libre entrada a los agentes interesados en prestarlo. Este mercado se denomina Mercado de Energía Mayorista – MEM y en él participan los agentes que desarrollan las cuatro actividades de la cadena productiva del mercado eléctrico, a saber: Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización.

En el proceso de generación los operadores producen la energía en grandes cantidades a partir de plantas de generación hidráulica y térmica y la venden a los comercializadores a un precio acorde a las fluctuaciones originadas por la oferta y la demanda. Esta actividad puede ser desarrollada conjuntamente con la comercialización.

En el proceso de transmisión, se transporta la energía por las redes de alta tensión (≥ 220 kV) Que interconectan los puntos de generación con los grandes centros de consumo. En Colombia Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. es el principal transportador en el Sistema de Trasmisión Nacional (STN), siendo propietaria de cerca del 75% de los activos de la red.

La distribución es la actividad de transportar energía eléctrica a través de un conjunto de líneas y subestaciones, con sus equipos asociados, que operan a tensiones menores de 220 kV dedicadas al servicio de un sistema de distribución municipal, distrital o local.

La comercialización, operación final del mercado eléctrico, donde el comercializador compra grandes volúmenes de energía, la entrega en pequeñas cantidades

¹Esta ley aplica a los servicios públicos domiciliarios: Acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural; a las actividades que realicen las personas prestadoras de servicios públicos de que trata el artículo 15 de la presente ley, y a las actividades complementarias definidas en el Capítulo II del presente título y a los otros servicios previstos en normas especiales de esta ley.

²Establece el régimen de las actividades de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad

a los usuarios finales. El comercializador es el responsable de la facturación, el recaudo y el pago de todos los componentes de la cadena.

En el mercado se distinguen dos tipos de usuarios

Los usuarios no regulados o grandes usuarios: Son aquellos con una demanda de potencia máxima superior a los 100 kW o su equivalente en consumo de energía de 55 MWh .

Los usuarios regulados son aquellos usuarios que no cumplen las condiciones para ser catalogados como usuarios no regulados, están sujetos a un contrato de condiciones uniformes y las tarifas son reguladas por la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) mediante una fórmula tarifaria general.

Existen en la literatura diferentes tipos de modelos matemáticos que tratan de representar el comportamiento de los agentes que participan en el mercado eléctrico, dependiendo de la estructura del mismo (Competitivos, Oligopólicos, monopólicos o regulados). La mayor parte de estos trabajos establecen relaciones de equilibrio entre generadores de tal forma que se maximicen sus ingresos basados en la determinación de las cantidades óptimas a negociar en el mercado *Spot*.

En el presente trabajo se plantea un modelo económico de optimización para la cadena de abastecimiento del mercado eléctrico en donde participan generadores, comercializadores y usuarios no regulados. Para el planteamiento del modelo no se consideró el caso de venta directa entre generadores y usuarios no regulados, por que se utiliza la metodología de programación en dos niveles donde el objetivo es trabajar mediante un sistema de cooperación que busca maximizar el ingreso de un generador a la vez que se maximizan los beneficios de los comercializadores a quienes abastece.

El generador maximiza sus ingresos teniendo en cuenta su capacidad y la demanda solicitada por los comercializadores, quienes a su vez maximizan su utilidad teniendo en cuenta la energía solicitada por los usuarios en el período t y la modalidad de los contratos suscritos con los mismos. Existen dos tipos de contratos, pague lo contratado³ y pague lo demandado⁴, en el primer caso el comercializador conoce exactamente sus requerimientos de energía en el periodo t . En el segundo caso el comercializador debe utilizar algún método estadístico para tener una proyección de la demanda a suplir en el período t de tal manera que las pérdidas sean mínimas. Los usuarios eligen libremente a quien comprarle teniendo en cuenta las mejores condiciones en los precios de venta de la energía.

³Tipo de contrato del mercado de energía mayorista en el que el comercializador se compromete a pagar toda la energía contratada, independiente de que ésta sea consumida o no. Si el consumo es mayor que la energía contratada, la diferencia se paga al precio de la Bolsa de Energía. Si el consumo es menor que la energía contratada, este excedente se le paga al comercializador al precio de la Bolsa.

⁴Tipo de contrato del mercado de energía mayorista en el que el agente comprador solamente paga (a precio de contrato) su consumo, siempre y cuando éste sea inferior o igual a la cantidad de energía contratada (tope máximo). Si el consumo es superior, la diferencia se liquida al precio de la Bolsa de Energía. También denominado pague lo consumido.

Capítulo 2

Descripción del Problema

2.1 Antecedentes

El mercado eléctrico tiene el problema que no puede almacenar stocks, cuando la demanda es baja, para venderlos más adelante y debe abastecer continuamente 24 horas los 365 días del año, a millones de clientes, con una garantía de suministro completa.

El objetivo del mercado eléctrico es satisfacer las necesidades de los usuarios finales, con altos estándares de calidad y a precios justos. Las relaciones directas que se presentan para tal efecto son: Generadores - Comercializadores, Comercializadores - Usuarios, Generadores - Usuarios. Los agentes tienen diferentes opciones para interactuar: Mediante relaciones de cooperación buscando beneficios mutuos; relaciones de no cooperación buscando su propio beneficio.

En los últimos años se ha incorporado metodologías de teoría de juegos al análisis del mercado eléctrico [1], para entender el manejo del poder que ejercen algunos generadores en su ejercicio. Los generadores compiten entre sí con el objetivo de captar la mayor parte del mercado mediante la manipulación de precios a fin de maximizar sus utilidades. La apertura de un mercado libre busca establecer las condiciones de equilibrio entre los oferentes.

Estas metodologías han planteado modelos de cooperación entre generadores para tratar de encontrar el punto de equilibrio del mercado, lo que favore al usuario final y modelos de no cooperación que buscan el propio beneficio lo que conlleva a la pérdida del mercado en el caso que los precios establecidos sean muy altos o a no recuperar la inversión en caso contrario.

En estos análisis no se han tenido en cuenta a los comercializadores, siendo ellos parte importante de la cadena ya que son los que mantienen relación directa con el usuario final; ni los usuarios no regulados, a pesar, que tienen un impacto grande en su aporte económico al mercado.

En este trabajo los comercializadores y usuarios no regulados cumplen un papel importante en la modelación del comportamiento del mercado eléctrico.

2.2 Planteamiento del Problema

Mediante la realización de este trabajo se pretende dar respuesta a la pregunta ¿Es posible cooperar a diferentes niveles en el mercado eléctrico para buscar *“la mejor decisión”* en términos de mayores beneficios para un generador y para los comercializadores a quienes abastece y que a la vez sea provechoso para los usuarios?. Para ello se parte de información de cada participante activo y se hace uso de una herramienta informática.

Se plantea una cadena de suministro de energía en la que intervienen generadores, comercializadores y usuarios no regulados, se busca maximizar la utilidad de cada generador a la vez que se maximizan las utilidades de los comercializadores que son abastecidos por este generador, se utilizarán métodos de optimización bi nivel, donde existe un nivel superior conformado por un generador y un nivel inferior conformado por comercializadores, cada uno de los cuales forma un subnivel del nivel inferior.

En la práctica la maximización de utilidades de un comercializador conlleva a la disminución de utilidades de otro, la optimización binivel encuentra *“la mejor solución”* para todos los participantes.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Teoría de Juegos

La influencia de la teoría de juegos en diferentes áreas es grande debido a que es un enfoque muy útil para estudiar comportamientos económicos y sociales. La teoría de juegos analiza situaciones en que las decisiones que toma una persona pueden verse afectadas de forma distinta dependiendo de las decisiones de otras personas, es decir, existen otros tomadores de decisiones actuando de acuerdo con sus propios criterios, que deben ser considerados.

3.1.1 Tipos de Juegos

La teoría de juegos se puede desarrollar a partir de diferentes tipos de juegos, que determinan qué métodos particulares se pueden aplicar para resolverlos. En general, se pueden considerar tres clases de juegos [2]:

- Juegos en forma estratégica: Está formado por un conjunto N de n jugadores, para cada jugador un conjunto de estrategias S_i y una función de utilidad U_i o pago que asigna un número real a cada combinación posible de estrategias (s_1, \dots, s_n) en el conjunto de estrategias S_i . Todos los jugadores toman la decisión simultáneamente y el juego culmina en el momento en que cada estrategia es revelada y cada jugador recibe el correspondiente pago.

Si un jugador tiene una estrategia que le proporciona más utilidad que cualquier otra, sin importar que hagan los demás jugadores, se le llama *estrategia fuertemente dominante*. Un concepto muy importante en la teoría de juegos es el denominado *punto de equilibrio de Nash* esta es una situación en la que ninguno de los jugadores siente la tentación de cambiar de estrategia ya que cualquier cambio implicaría una disminución en su utilidad.

- Juegos en forma extensiva: Se definen tres aspectos: La posición del jugador, el movimiento durante el juego (el cual puede ser aleatorio o puede seguir una distribución de probabilidad) y la información utilizada por los jugadores cuando realizan el movimiento deseado. Si cada jugador conoce los movimientos del pasado y la utilidad adquirida en las pasadas jugadas, es un juego con información perfecta, de lo contrario, es un juego con información imperfecta.
- Juegos en forma coalicional: Se caracteriza por la realización de acuerdos o coaliciones entre los jugadores, con el fin de alcanzar mayores utilidades al trabajar en conjunto. En este tipo de juegos se presenta el dilema de cómo repartir la utilidad entre los miembros de la coalición para que ninguno de ellos esté interesado en romperla.

Los juegos estratégicos y extensivos son juegos no cooperativos

Los juegos también pueden ser subdivididos en juegos suma-cero y suma-no cero. En los juegos de suma nula o cero el beneficio total para todos los jugadores, en cada combinación de estrategias, siempre suma cero, es decir, un jugador se beneficia solamente a expensas de otros. En los juegos de suma no cero la ganancia de un jugador no necesariamente se corresponde con la pérdida del otro.

3.1.2 Modelos Clásicos de Oligopolio

Cuando se habla en general de mercados se tiene en cuenta un conjunto de transacciones, acuerdos o intercambios de bienes y servicios entre compradores y vendedores. El mercado da origen al mecanismo de la oferta y demanda creando la competencia entre los participantes.

La competencia es una forma de organizar los mercados que permite determinar los precios y las cantidades de equilibrio. El criterio más frecuentemente utilizado para clasificar los distintos tipos de mercados es el que se refiere al número de participantes en él.

Se dan dos tipos de competencias: *La competencia perfecta* donde existe un gran número de compradores y vendedores, de forma que ningún comprador o vendedor individual ejerce influencia decisiva sobre el precio, es una representación idealizada de los mercados de bienes y de servicios en la que la interacción recíproca de la oferta y la demanda determina un precio de equilibrio, a este precio las empresas deciden libremente que cantidad producir. A partir del precio de equilibrio cada empresa individual producirá la cantidad que le indique su curva de oferta. En un mercado de competencia perfecta hay una tendencia a minimizar los costos y equilibrar los beneficios, las empresas que pretenden obtener mayores beneficios deben recurrir al máximo aprovechamiento de sus recursos.

La competencia imperfecta se genera en un mercado donde concurren un número reducido de vendedores (oligopolio) o en el caso extremo, el mercado es controlado por un sólo productor (monopolio). Bajo un esquema de oligopolio

los agentes tienden a asumir posiciones no cooperativas buscando maximizar sus beneficios, en este tipo de mercado el productor o productores son los suficientemente grandes como para tener un efecto sobre el precio.

En general, puede afirmarse que cuanto más elevado resulte el número de participantes, más competitivo será el mercado.

Los mercados oligopólicos se analizan tradicionalmente mediante teoría de juegos. El análisis del oligopolio reconoce dos posibles soluciones:

1. **Modelo de Cournot.** De acuerdo a este modelo, cada empresa en un mercado de duopolio compiten decidiendo sus niveles de producción, sin conocer la decisión de su rival, pero conscientes de que el precio al que venderán su producto dependerá de la producción de las dos empresas. El modelo se basa en dos conceptos fundamentales de las empresas en un mercado de duopolio: que cada una se comportará en una forma maximizadora de las utilidades y que cada una supondrá que la otra empresa mantendrá constante su producción al nivel existente cuando cambie su propia producción. Primero una empresa selecciona lo que considera un nivel de producción maximizador de utilidades. Después, conociendo la elección que ha hecho esa empresa de una cantidad y suponiendo que no cambiará, la otra empresa fija su propia cantidad maximizadora de utilidades. Este proceso continua a traves de varias etapas de accion y reaccion hasta que las empresas alcanzan un equilibrio.
2. **Modelo de Bertrand.** De acuerdo a este modelo, cada empresa en un mercado de duopolio establece un precio maximizador de utilidades en la creencia de que el precio elegido por su rival no cambiará, esto trae como consecuencia que las dos empresas participen en un proceso de fijación de precios competitivos hasta que el mercado llegue a un equilibrio. Al pensar que el precio establecido por su rival es fijo, primero una de las empresas y después la otra, cambian su precio con el fin de quitarle clientes y utilidades a su rival. Con el tiempo, las dos empresas llegan a un equilibrio, en el cual ninguna de ellas tiene un incentivo para cambiar mas su precio. Este equilibrio se logra cuando el precio del producto cae hasta el costo marginal.

En estos casos los agentes toman una decisión sin conocer la decisión de sus rivales y a continuación obtienen beneficios que dependen de las decisiones de todos los agentes involucrados, lo que marca el final del juego. En el modelo de Cournot las empresas actúan sobre las cantidades, en el de Bertrand, las empresas actúan sobre los precios; esta diferencia hace que los resultados a los que se llegue difieran mucho.

Klemperer y Meyer [3], [4] desarrollaron el enfoque de la función de oferta¹ donde los oferentes en un mercado oligopólico fijan parejas de precios y cantidades que representan su elección óptima, construyendo así su propia función de

¹Klemperer y Meyer argumentan que las empresas que operan en un mercado oligopólico bajo una demanda incierta prefieren establecer funciones de oferta antes que competir en precios o cantidades.

oferta, ésta le va a permitir entregar la cantidad deseada, al precio correspondiente, esta es una solución intermedia entre el modelo del Cournot y el modelo de Bertrand.

En el mercado de generación el modelo de Cournot es más aplicable que el modelo simple de Bertrand ya que en el primero las empresas pueden controlar el volumen ofrecido, teniendo en cuenta sus capacidades de generación, mientras que en el segundo se suponen ofertas ilimitadas a un precio único, lo cual no es cierto. La capacidad de generación es la que les permite a las empresas ganar cierto poder para optimizar sus resultados cuando participan en el juego oligopólico.

Cuando el mercado es monopolístico existe un agente productor o consumidor que tiene una posición privilegiada dentro del mercado y puede imponer sus condiciones al resto de participantes del mismo, en este caso el modelo Stackelberg es el apropiado, un agente elige su nivel de producción antes que la otra y esta última, cuando toma su decisión, se encuentra con que la decisión de la primera tiene un carácter irreversible.

1. **Modelo de Stackelberg.** Es un modelo similar al de Cournot con la diferencia que una empresa elige su nivel de producción antes que la otra y esta última, cuando toma su decisión, se encuentra con que la decisión de la primera ya tiene un carácter irreversible.

Dos empresas producen un bien idéntico, La empresa i , $i = 1, 2$ incurre en un costo $c_i q_i$ al producir la cantidad q_i , el precio al que se venderá su producto depende de la producción de ambas empresas, este precio es $P(q_1, q_2) = \max\{a - b(q_1 + q_2), 0\}$ con $0 < c_i < a$. La interacción entre las dos empresas toma la forma siguiente:

1. La empresa 1 elige $q_1 \geq 0$
2. Conociendo la decisión de la empresa 1, la empresa 2 elige $q_2 \geq 0$
3. Cada empresa recibe beneficios $\pi_i(q_1, q_2) = [P(q_1, q_2) - c_i]q_i$

Se tiene entonces un juego que se desarrolla en forma secuencial. La estrategia para la empresa 1 especifica simplemente un nivel de producción $q_1 \geq 0$. La estrategia de la empresa 2 tiene que especificar un nivel de producción $q_2 \geq 0$ para cada posible nivel de producción de la empresa 1 q_1 . La estrategia de la empresa 2 se representa $R_2(q_1)$.

Después de cada decisión posible de la empresa 1, q_1 empieza un subjuego. Por eso, para que una estrategia del jugador 2 pueda hacer parte del equilibrio perfecto en un subjuego, debe maximizar los beneficios del jugador 2 para cada nivel de producción de la empresa 1, q_1 .

Un equilibrio perfecto en subjuegos es un par de estrategias $q_1^S, R_2^S(q_1)$ tales que:

- i. Dada la estrategia $R_2^S(q_1)$ de la empresa 2, q_1^S maximiza los beneficios de la empresa 1.

- ii. La estrategia $R_2^S(q_1)$ de la empresa 2, maximiza los beneficios de esta empresa para cualquier q_1 en $[0, \infty)$ que elija la empresa 1.

Entonces la estrategia del jugador 2, $R_2^S(q_1)$, debe solucionar para cualquier q_1 en $[0, \infty)$ el siguiente problema:

$$\max_{q_2} \pi_2(q_1, q_2) = q_2[a - b(q_1 + q_2)] - c_2 q_2$$

La solución a este problema da como resultado:

$$R_2^S(q_1) = \begin{cases} 0 & \text{Si } \frac{a-c_2}{b} - q_1 < 0 \\ \frac{a-c_2-bq_1}{2b} & \text{Si } \frac{a-c_2}{b} - q_1 > 0 \end{cases}$$

En el modelo de Stackelberg $R_2^S(q_1)$ es la estrategia óptima de la empresa 2. Esta empresa observa la decisión de su rival antes de tomar la suya propia y $R_2^S(q_1)$ indica la cantidad que elegirá cuando observe el nivel de producción q_1 elegido por la empresa 1.

En Colombia, los generadores más importantes operan como oligopolistas líderes, en tanto que los demás son seguidores. Así, el mercado debería representarse como una mezcla del modelo de función de oferta (modelo Cournot-Bertrand) y del modelo líder y seguidor de Stackelberg. Los líderes cuentan con varias plantas de generación, lo que les permite establecer su función de oferta creciente que resuelva adecuadamente su problema de maximización, generando un equilibrio de Nash en el juego con los demás líderes.

La posibilidad de establecer una función de oferta creciente es relevante, porque abre la posibilidad en el mercado de que el precio de equilibrio difiera del costo marginal.

3.2 Estructura del Mercado Eléctrico Colombiano

En esta sección se presenta la composición del Mercado Eléctrico Colombiano, los órganos regulatorio, de control y de planeación, la organización del mercado, los órganos de operación y administración, los órganos de consulta y asesores y los diferentes tipos de agentes que participan en el mercado [5], [6].

3.2.1 Organos Regulatorio, de Control y de Planeación

1. **Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)**². Autoridad regulatoria del sector energético, electricidad y gas, su objetivo básico es asegurar una adecuada prestación del servicio mediante el aprovechamiento eficiente de los diferentes recursos energéticos, en beneficio del usuario en términos de calidad, oportunidad y costo del servicio.

² Creada por el artículo 10 del Decreto 2119 de 1992

2. **Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD)** ³. Desempeña funciones específicas de control y vigilancia, con independencia de las Comisiones de Regulación y con la inmediata colaboración de los Superintendentes delegados.
3. **Unidad de Planeación Minero Energética. (UPME)** ⁴. Organizada como Unidad Administrativa Especial adscrita al Ministerio de Minas y Energía, que tiene entre sus funciones elaborar y actualizar el Plan de Expansión de Referencia del sector eléctrico, de tal manera que los planes para atender la demanda sean lo suficientemente flexibles para que se adapten a los cambios que determinen las condiciones técnicas, económicas, financieras y ambientales; que cumplan con los requerimientos de calidad, confiabilidad y seguridad determinados por el Ministerio de Minas y Energía.

3.2.2 Organización del Mercado

En el Mercado de Energía Mayorista (**MEM**), participan los agentes que desarrollan las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización, y los grandes consumidores de electricidad.

- **Generación:** Actividad consistente en la producción de energía eléctrica mediante una planta conectada al Sistema Interconectado Nacional, esta actividad se puede desarrollar en forma exclusiva o combinada con la comercialización
- **Transmisión:** Actividad consistente en el transporte de energía eléctrica a través del conjunto de líneas, con sus correspondientes módulos de conexión, que operan a tensiones iguales o superiores a 220 kV, o a través de redes regionales o interregionales de transmisión a tensiones inferiores.
- **Distribución:** Actividad de transportar energía eléctrica a través de un conjunto de líneas y subestaciones, con sus equipos asociados, que operan a tensiones menores de 220 kV que no pertenecen a un sistema de transmisión regional por estar dedicadas al servicio de un sistema de distribución municipal, distrital o local.

En los mercados eléctricos las actividades de transmisión y distribución están concentradas en un número reducido de agentes, dando origen a esquemas monopólicos.

- **Comercialización:** Actividad consistente en la compra de energía eléctrica en el mercado mayorista y su venta en el mismo mercado o a los usuarios finales, regulados o no regulados, se puede desarrollar en forma exclusiva o combinada con distribución o generación.

³ Creada por el artículo 370 de la Constitución Política como un organismo de carácter técnico, adscrito al Departamento Nacional de Planeación – DNP de acuerdo al decreto ley 1363 de 2000.

⁴ Regida por la Ley 143 de 1994 y por el Decreto 255 de 2004

3.2.3 Órganos de Operación y Administración

1. **Centro Nacional de Despacho (CND).** Dependencia de Interconexión Eléctrica S.A., encargada de la planeación, supervisión y control de la operación integrada de los recursos de generación, interconexión y transmisión del Sistema Interconectado Nacional - SIN. Está igualmente encargado de preparar el despacho de generación y dar las instrucciones de coordinación a los distintos agentes que participan en la operación del SIN, con el fin de tener una operación económica, segura, confiable y ceñida al reglamento de operación y a todos los acuerdos del Consejo Nacional de Operación.
2. **Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC).** Dependencia de Interconexión Eléctrica S.A., encargada del registro de fronteras comerciales y de los contratos de energía a largo plazo; de la liquidación, facturación, cobro y pago del valor de los actos o contratos de energía transados en la Bolsa por generadores y comercializadores; del mantenimiento de los sistemas de información y programas de computación requeridos; de la gestión de cartera y del manejo de garantías; y del cumplimiento de las tareas necesarias para el funcionamiento adecuado del Sistema de Intercambios Comerciales - SIC. Para realizar estas operaciones el ASIC celebra un contrato de mandato con cada agente inscrito en el mercado.
3. **Liquidador y Administrador de Cuentas del Sistema de Transmisión Nacional - STN. (LAC)** Dependencia de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P - ISA, que participa en la administración del MEM, encargada de liquidar y facturar los cargos de uso de las redes del Sistema Interconectado Nacional que le sean asignadas, de determinar el ingreso regulado a los transportadores y de administrar las cuentas que por concepto del uso de las redes se causen a los agentes del mercado mayorista.

3.2.4 Organos Consultor y Asesores

1. **Consejo Nacional de Operación (CNO)** ⁵. Su función principal acordar los aspectos técnicos para garantizar que la operación integrada del sistema interconectado nacional sea segura, confiable y económica, y ser el órgano ejecutor del reglamento de operación. El CNO es órgano de consulta de la CREG.
2. **Comité Asesor de Comercialización (CAC).** ⁶. Asiste a la CREG en el seguimiento y la revisión de los aspectos comerciales del mercado mayorista de energía.

⁵ Organismo creado por la Ley 143 de 1994

⁶ Creado mediante Resolución CREG- 068 de 2000 y modificado por las Resoluciones CREG-030 de 2001 y CREG-123 de 2003.

3. **Comité Asesor de Planeamiento de la Transmisión (CAPT.)** ⁷. Asesora a la UPME en la compatibilización de criterios, estrategias y metodologías para la expansión del STN.

3.2.5 Tipos de Usuario

El mercado eléctrico sirve a dos tipos de usuarios los regulados y los No regulados.

1. **Usuarios no regulados o grandes usuarios**, son aquellos con una demanda de potencia superior a los 100 KW o su equivalente en consumo de energía de 55 MWh/mes. La Ley otorgó a la CREG la facultad de reducirlo gradualmente, hasta donde se encontrara adecuado. Inicialmente se fijó como límite 2 MW, el cual se fue reduciendo hasta el valor vigente antes mencionado. Los usuarios no regulados pueden establecer con el comercializador de energía un contrato bilateral y los precios de venta y cantidades de energía son libres y acordados entre las partes. Los demás cargos se ajustan a la regulación respectiva.
2. **Usuarios regulados**, son aquellos usuarios que no cumplen las condiciones para ser catalogados como usuarios no regulados, están sujetos a un contrato de condiciones uniformes y las tarifas son reguladas por la CREG mediante una fórmula tarifaria general.

Los generadores y comercializadores son los agentes activos que participan en el MEM, Los transportadores (Transmisores y distribuidores) son agentes pasivos.

Las transacciones realizadas entre generadores y comercializadores en el MEM, se efectúan bajo dos modalidades:

- Mediante la suscripción de contratos financieros bilaterales de compra y venta de energía, en este caso los precios y magnitud son establecidos libremente entre compradores y vendedores, están sujetos a las condiciones establecidas por el mercado ⁸.
- Por medio de transacciones directas en la Bolsa de energía: Los generadores que participan en el MEM deben presentar ofertas de precio en la Bolsa de energía. Dichos precios deben reflejar los costos variables de generación en los que esperan incurrir más una componente de riesgo⁹.

Las centrales entregan diariamente un calendario de audiciones que consiste en un precio auditado y en su capacidad disponible para cada hora del siguiente día. Cada hora el CND despacha las generadoras de acuerdo a su capacidad

⁷Creado mediante Resolución CREG-051 de 1998, modificado por la Resolución 085 de 2002

⁸Resolución CREG 47 de 2000

⁹Resolución CREG 055 de 1999

disponible en orden creciente de sus posturas, hasta que la suma de sus capacidades sobrepasa la demanda. La última en despacharse recibe el nombre de firme marginal y es sólo utilizada para satisfacer la demanda residual no cubierta por las restantes firmas. El precio del mercado spot se fija igual a la postura realizada por la firma marginal, y toda la energía vendida por los generadores y comprada por los comercializadores se transa a este precio. Cuando se produce una situación en que dos firmas ofrecen el mismo precio, La Bolsa elige al azar una de las dos para despacharla primero. Sin embargo, si la demanda no puede ser absorbida por la primera, se despacha la segunda para cubrir la demanda residual. Este sistema de despacho de centrales fue diseñado para fomentar la competencia vía precios, con el objetivo de incrementar la calidad del suministro, la mejora del medio ambiente y hacer que los precios se autorregulen en un mercado libre.

Las compras de energía efectuadas por comercializadores con destino a Usuarios Regulados, mediante la suscripción de contratos bilaterales, se rigen por las disposiciones establecidas en la regulación ¹⁰, las cuales garantizan la competencia en este tipo de transacción.

Las compras de energía efectuadas por comercializadores con destino a Usuarios No Regulados, mediante la suscripción de contratos bilaterales, no están reguladas y se negocian a precios y condiciones pactadas libremente.

Las empresas comercializadoras pueden comercializar energía con un solo tipo de usuario o con ambos. Los costos de prestación del servicio para los usuarios son establecidos por las empresas comercializadoras y está determinada por cinco componentes básicas: Generación (G), transmisión (T), distribución (D), comercialización (C), y otros costos (O). La suma de estas componentes de costo se denomina *Costo Unitario de Prestación del Servicio CU*.

Para la Tarifa a los usuarios regulados el *CU* se calcula mediante la expresión: $CU = \frac{G+T}{1-P} + D + C + O$ ¹¹ donde *P* representan las pérdidas de energía reconocidas .

donde:

G: Costo de compra de energía (\$/kWh) por parte del comercializador. Se calcula como un promedio del valor de las compras del comercializador en el mercado de energía mayorista (a través de contratos y/o en la bolsa de energía) durante los últimos doce meses. Para efectuar la compra de energía con destino al mercado regulado para un período determinado mediante un contrato de largo plazo, la empresa efectúa una licitación pública y está obligada a escoger el oferente con el precio más bajo.

¹⁰ Resolución CREG 020 de 1996

¹¹ La Comisión de Regulación de Energía y Gas, como entidad competente según lo previsto en la Ley 142 de 1994, a través de las Resoluciones CREG-031, 079 y 244 de 1997, aprobó las fórmulas generales que permiten a los comercializadores de electricidad establecer los costos de prestación del servicio a usuarios regulados y las tarifas correspondientes en el Sistema Interconectado Nacional.

El Costo Unitario de Prestación del Servicio (CU), es un costo económico eficiente que resulta de agregar los costos de las actividades de Generación, Transmisión, distribución y Comercialización.

T : Corresponde al costo promedio por uso del Sistema de Transmisión Nacional ($\$/kWh$). La metodología de cálculo de este valor se modificó¹².

D : Corresponde al costo de transporte por las redes de distribución ($\$/kWh$) correspondiente al nivel de tensión n para el mes m . En conjunto con el T (componente de transmisión), remuneran el transporte de energía desde las plantas de generación hasta el inmueble del usuario final.

O : Costos adicionales del mercado mayorista ($\$/kWh$), correspondientes al mes m del año t . Incluye primordialmente los costos asignados a los comercializadores por restricciones en las redes y la utilización de otros servicios como lo son los del Centro Nacional de Despacho¹³ y los del Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales y los pagos de las contribuciones a la CREG y a la SSPD.

P : Pérdidas de energía acumuladas hasta el nivel de tensión n , reconocidas para el año t . Este porcentaje en 1998 fue del 20% y actualmente se encuentra en 14.75%. Con este mecanismo, se impide que el prestador del servicio traspase a los usuarios ineficiencias derivadas de no tener ni ejecutar planes de recuperación de las pérdidas.

C : Costo de comercialización ($\$/kWh$) correspondiente al mes m del año t . Es igual al costo de atención de la clientela y mediante este valor se remuneran los costos máximos asociados con la atención de los usuarios, tales como la facturación, lectura, atención de reclamos, etc.

Mediante la resolución 079 de 1997 se establece que las fórmulas para calcular las tarifas, en términos generales son:

Tarifa estratos 1, 2, 3 = $CU - \text{Subsidio}$

Tarifa estrato 4 y *Oficial* = CU

Tarifa estratos 5, 6 y No residenciales = $CU + \text{Contribución}$

Todos los comercializadores que atiendan usuarios finales conectados al Sistema Interconectado Nacional, están obligados a registrar las transacciones de la energía en el MEM (Resolución CREG 053 de 1994).

3.3 Programación binivel

3.3.1 El problema de la programación binivel

Muchos problemas de planeación requieren la toma de decisiones de diferentes sectores (Corporaciones, entidades, empresas, etc) involucrados; en la mayoría de los casos cada sector busca su propio beneficio y la consecución de éste afecta negativamente los intereses de los demás. Las decisiones multinivel son consideradas como una herramienta importante en el desarrollo de todo proceso de planeación.

En los problemas de programación multinivel (**MLP**) se considera que un sector o nivel (denominado nivel superior) dentro del sistema analizado, envía

¹² Resolución CREG-103 de 2000.

¹³ Centro Nacional de Despacho.

información tentativa a los demás sectores o niveles (Niveles inferiores), para observar su reacción y tomar decisiones que lo beneficien.

En el **MLP** se desea optimizar un conjunto de funciones objetivos (Una para cada nivel involucrado) bajo una región factible general. El control sobre las variables decisión se divide entre todos los niveles, pero, la variable decisión de un nivel puede afectar la funciones objetivo de los demás niveles.

Los problemas de este tipo presentan las siguientes características:

- Existe interacción entre las decisiones tomadas por cada unidad, pero de acuerdo a una estructura jerárquica.
- La toma de decisiones es secuencial, del nivel más alto al más bajo. El nivel de decisión más bajo ejecuta sus acciones después que el nivel más alto ha tomado las suyas.
- Cada nivel tiene su función objetivo y busca optimizarla independientemente de las otras unidades, pero es afectada por las acciones y reacciones de éstas.
- El problema de optimización de cada nivel afecta la función objetivo y las restricciones de los otros niveles.

La programación binivel (**BPL**) es un caso particular del **MLP**, en este caso se tienen dos niveles de decisión, el nivel alto (Donde hay un líder) y el nivel bajo (Donde hay un seguidor). El líder controla el vector de decisión $x_1 = (x_{11}, \dots, x_{1n_1})$ el seguidor controla el vector de decisión $x_2 = (x_{21}, \dots, x_{2n_2})$. El sistema global está sujeto a un conjunto de restricciones que determinan la región factible $S \subset E^{n_1+n_2}$ para x_1 y x_2 . Donde E^n denota el espacio n -dimensional.

El líder y el seguidor juegan “*El juego de duopolio de Stackelberg*” donde la idea básica es la siguiente: El líder escoge el vector de decisión x_1 que maximice su *Utilidad* o que minimice sus *Costos*, Sea esta función $Z_1(x_1, x_2)$. El seguidor teniendo en cuenta la decisión del líder escoge su vector de decisión x_2 que de igual forma maximice su *Utilidad* o que minimice sus *Costos*, Sea esta función $Z_2(x_1, x_2)$. Si las funciones son lineales el problema se puede formular de la siguiente manera:

$$\max Z_1(x_1, x_2) = C_{11}x_1 + C_{12}x_2$$

(*Problema del nivel alto*)

Donde el nivel bajo resuelve:

$$\max Z_2(x_1, x_2) = C_{21}x_1 + C_{22}x_2$$

Sujeto a:

$$S = \{(x_1, x_2) : A_1x_1 + A_2x_2 \leq b \text{ y } x_1, x_2 \geq 0\}$$

Para la solución del problema se asume que el nivel alto primero especifica x_1 y el nivel bajo especificará x_2 teniendo total conocimiento de la decisión del nivel alto.

El conjunto solución para el nivel bajo está dado por:

$$R(x_1) = \{x_2^* : (x_1, x_2^*) \in S \text{ y } Z_2(x_1, x_2^*) \geq Z_2(x_1, x_2) \text{ Para todo } (x_1, x_2) \in S\}$$

El conjunto solución para el nivel alto está dado por:

$$\Psi(S) = \{x_1 : (x_1, x_2) \in S \text{ y } x_2 \in R(x_1) \}$$

Definición 1 Un punto (x_1, x_2) es factible si $(x_1, x_2) \in \Psi(S)$

Definición 2 Un punto (x_1^*, x_2^*) es óptimo si $Z_2(x_1^*, x_2^*)$ es único para todo $x_2^* \in R(x_1)$ y $Z_2(x_1^*, x_2^*) \geq Z_2(x_1, x_2)$ Para todo $(x_1, x_2) \in \Psi(S)$

3.3.2 Sistema bi nivel descentralizado

Se considerará el caso en que el nivel bajo está dividido en k niveles bajos o subniveles. El vector decisión en el nivel alto es x_1 y la función objetivo $f_1(\mathbf{x})$ y en los k niveles bajos los vectores de decisión son x_2, \dots, x_k respectivamente y las funciones objetivos $f_i(\mathbf{x})$, $i = 1, \dots, k$ estos vectores pueden ser de diferente dimensión, el problema se puede formular de manera general de la siguiente manera:

$$\max \sum_{j=1}^n C_{1j} x_j$$

(Problema del nivel alto)

Donde cada subnivel resuelve:

$$\max \sum_{j=1}^n C_{ij} x_j \quad i = 2, \dots, k$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} x_j \leq b$$

$$x_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, k$$

3.3.3 Características de las soluciones

Los problemas de programación binivel presentan propiedades geométricas complejas con relación a los problemas de programación matemáticas, estas son:

1. La solución en el nivel bajo puede no ser única para un valor fijo x_1 . Aunque la no unicidad de la solución no afecte el valor de la función $Z_2(x_1, x_2)$, estas soluciones pueden causar grandes variaciones en el valor

de $Z_1(x_1, x_2)$, puede darse el caso que $Z_1(x_1, x_2)$ sea indefinida. Algunos autores han propuesto soluciones alternativas a este problema.^{14, 15}

2. La región factible $\Psi(S)$ para el problema en el nivel alto es no convexa, pero es un conjunto cerrado.
3. Si (x_1, x_2) es un punto extremo de la de $\Psi(S)$ entonces es un punto extremo de S , esto significa que una solución óptima al problema lineal **BPL** ocurre en un punto extremo del conjunto de soluciones factibles generado por las restricciones.
4. Es posible establecer límites para la solución óptima al problema en el nivel alto. Si (x_1^*, x_2^*) es una solución al problema de $\max Z_2(x_1, x_2)$ sobre el conjunto S , entonces $(x_1^*, x_2^*) \in \Psi(S)$ y $Z_1(x_1^*, x_2^*)$ es un límite inferior al problema del nivel alto. Por otro lado una solución (x_1^{**}, x_2^{**}) al problema de $\max Z_1(x_1, x_2)$, no es necesariamente factible, sin embargo $Z_1(x_1^{**}, x_2^{**})$ puede considerarse como una frontera superior al problema en el nivel alto.
5. La solución al problema **BPL** puede no ser pareto óptima.

3.3.4 Técnicas de Solución

Existen en la literatura diferentes técnicas de aproximación a la solución del **BPL**. La primera categoría de algoritmos está basada en el hecho que la solución óptima al problema lineal **BPL** ocurre en un punto extremo del conjunto de soluciones factibles generado por las restricciones, se utiliza la técnica de enumeración de vértices. La segunda categoría reemplaza el problema original por un problema equivalente donde las funciones objetivo en los niveles inferiores son consideradas como restricciones del problema inicial, se utilizan las condiciones de Kunh Tucker.

1. Enumeración de vértices

El enfoque de la enumeración de vértices se basa en el hecho de que un punto extremo de la región $\Psi(S)$ es un punto extremo de S . El mejor algoritmo al respecto fue propuesto por Bialas and Karwan [7]. Primero se resuelve el problema $\max Z_1(x_1, x_2)$ sobre la región factible S para encontrar la primera mejor solución. Si la solución no pertenece al conjunto $\Psi(S)$ se busca la segunda mejor solución encontrando entre todos los puntos extremos adyacentes el mejor. El algoritmo se mueve a través de estos puntos extremos hasta que encuentra el k -ésimo mejor punto dentro de $\Psi(S)$.

¹⁴W.F Bialas and M.H. Karwan. "Two Level Linear Programming problem" proponen perturbar la función objetivo en el nivel bajo y expresarla como: $Z_2(x_1, x_2) = Z_2(x_1, x_2) + \varepsilon Z_1(x_1, x_2)$ para $\varepsilon > 0$, así se obtendrá un óptimo para Z_2 asegurando la existencia de Z_1 .

¹⁵F. A. Parraga "Hierarchical Programming and applications to economic policy" propone definir una función $m(x_1)$ que represente el óptimo de la función $Z_1(x_1, x_2)$ para todos los valores x_2 posibles que optimizan Z_2 para un valor fijo x_1 , y entonces optimizar $m(x_1)$

2. Aproximación de Kuhn Tucker

De acuerdo con esta técnica el problema inicial, sea este **P1**:

$$\max Z_1(x_1, x_2) = C_{11}x_1 + C_{12}x_2 \quad (\text{Problema del nivel alto})$$

Donde el nivel bajo resuelve:

$$\max Z_2(x_1, x_2) = C_{21}x_1 + C_{22}x_2$$

Sujeto a:

$$S = \{(x_1, x_2) : A_1x_1 + A_2x_2 \leq b \text{ y } x_1, x_2 \geq 0\}$$

Se transforma en un problema equivalente **P2** donde las funciones objetivo a maximizar en el nivel inferior se convierten en restricciones del problema inicial, el planteamiento es el siguiente:

$$\max Z_1(x_1, x_2) = C_{11}x_1 + C_{12}x_2$$

Sujeto a :

$$\begin{aligned} wA_2 &= C_{22} \\ w(A_1x_1 + A_2x_2 - b) &= 0 \\ A_1x_1 + A_2x_2 &\leq b \\ w, x_1, x_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

Wen U.P [8] and Bard J.F [9] han demostrado que $(x_1, x_2) \in \Psi(S)$ si y solo sí existe w tal que (x_1, x_2, w) es una solución factible al problema **P2**.

Para cualquier tipo de funciones y restricciones, el problema de **BPL** se puede plantear de forma general como:

$$\max f_1(\mathbf{x})$$

$$\max f_i(\mathbf{x}) \quad i = 2, \dots, k$$

Sujeto a:

$$g(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$$

Y teniendo en cuenta las condiciones de Kuhn Tucker se tiene:

$$\max f_1(\mathbf{x})$$

Sujeto a:

$$\nabla_l f_i(\mathbf{x}) - \sum_{t=1}^T w_t \nabla_l g_t(\mathbf{x}) = 0$$

$$w_t g_t(\mathbf{x}) = 0$$

$$g(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$$

$$w_t \geq 0$$

$i = 2, \dots, k$ T es el número de restricciones, ∇_l es el gradiente con respecto a x_l (de las variables controladas por el subnivel i)

3.4 Estado del Arte

Equilibrio en mercados eléctricos

Existen en la literatura muchas aplicaciones de los conceptos relacionados con los problemas de equilibrio en el mercado eléctrico, donde los generadores asumen diferentes posiciones, se presentará una breve referencia de algunos de los documentos consultados.

- **Richard Green and David M. Newbery, (1998).** “*Competition, contracts and entry in the electricity spot market*”. [10]

Presentan una metodología para modificar el funcionamiento del mercado spot Inglés, se plantea un modelo analíticamente sencillo para ampliar el mercado spot y considerar, un mercado de contratos que facilite la entrada de nuevos agentes creando así mayor competencia. Este modelo considera un número variable de competidores con restricciones de capacidad.

Cuando se analiza el equilibrio en mercados spot y contractual conjuntamente se presenta la dificultad que este equilibrio no es único, el modelo planteado conlleva a un único punto de equilibrio para el caso donde el agente es respaldado por los contratos y se determina el nivel de venta de los mismos para alcanzar el equilibrio.

El modelo para el agente i cuando no se consideran contratos y se tienen dos competidores es de la forma:

$$\pi_i(p, t) = p[D(p, t) - q_j(p)] - C[D(p, t) - q_j(p)]$$

Donde:

$D(p, t)$: Demanda total del mercado, $D(p, t) = S^i(p(t)) + S^j(p(t))$

$q_j(p)$: Cantidad vendida por el agente j

p : Precio de venta

C : Costo de generación.

El despachador debe determinar el mínimo precio p que equilibra las dos firmas.

Cuando se consideran ventas por contratos, el modelo toma la forma:

$$\pi_i(p, t) = p[D(p, t) - q_j(p)] - C[D(p, t) - q_j(p)] + (f_i - p)x_i$$

Donde x_i es la cantidad a vender por contratos al precio f_i

- **Anderson, E.J. and Philpott A. B. (2002)** “*Optimal Offer construction in Electricity Market*” [11]

Presentan estrategias para que los generadores oferten en un mercado de electricidad, donde la demanda y el comportamiento de los competidores son desconocidos, pero, puede ser representado a través de una distribución de probabilidad. Dada esta distribución se establecen las condiciones necesarias de optimalidad para una amplia gama de curvas de oferta. Muestran como estas condiciones se pueden utilizar para construir una solución óptima a un ejemplo simple. También consideran el caso en que los generadores están restringidos en el precio al que pueden ofertar.

En este caso se presentan dos situaciones, el problema de determinar el precio se resuelve con el siguiente modelo:

$$\begin{aligned} & \min \sum_i \sum_k C_{ki}(u_{ki}) \\ \text{Sujeto a } & \sum_k u_{ki} + \sum_{j < i} v_{ji}^r - \sum_{j > i} v_{ij}^s = 0 \quad i = 1, \dots, N \\ & u \in U, (v^r, v^s) \in V \end{aligned}$$

Donde:

$C_{ki}(u_{ki})$: Función de costos de suministrar energía por parte del agente k al nodo i

N : Número de nodos

u_{ki} : Aporte de energía del agente k al nodo i

v_{ji}^s : Flujo de energía enviado del nodo i al nodo j

v_{ji}^r : Flujo de energía enviado del nodo i al nodo j

U : Conjunto de restricciones de demanda

El conjunto $V = V(s)$ representa lo que el generador espera recibir se calcula construyendo una función de oferta s para cada generador i , quien maximizará la función:

$$V(s) = \int_s R(q, p) d\psi_t(q, p)$$

$R(q, p)$: Función de Ingresos para el generador k

$\psi_i(q, p)$: Función de distribución de probabilidad para el ingreso en el periodo t

Para todos los períodos, se tiene:

$$V(s) = \sum_{t=1}^T \int_s R(q, p) d\psi_i(q, p)$$

Dentro de otras aplicaciones en este contexto podemos citar:

- **Bessembinder Hendrik, Michael Lemmon (2002).** *“Equilibrium Pricing and Optimal Hedging In Electricity Forward Markets”* [12]

Presentan un modelo de equilibrio que plantea que el precio de la electricidad a futuro tiene tendencia a disminuir siempre que la demanda de energía esperada sea baja y el riesgo sea moderado, sin embargo este valor aumentará cuando la demanda esperada o la variabilidad en la misma sea alta, debido al sesgo positivo de la distribución de probabilidad del precio de la electricidad en el mercado spot.

- **Ashkan R. Kiana, , and Jose B. Cruz, Jr.b, (2004)** *“Bidding strategies in dynamic electricity markets”* [13]

Desarrollan estrategias de oferta para los participantes en un mercado de electricidad oligopólico. Su atención se centra en ofertas estratégicas de carga para servir entidades del mercado. Modelan mercados de electricidad oligopolistas como sistemas dinámicos no lineales utilizando estrategias de oferta Nash en tiempo discreto. Asumen un modelo de Cournot para el juego donde las entidades deciden sobre cantidades de demanda y el precio del mercado es el costo marginal de producción de electricidad. Se asume que cada generador puede estimar los coeficiente de su función de utilidad

Desarrollan matemáticamente las estrategias de oferta óptima utilizando teoría de juegos dinámicos y desarrollos algorítmicos.

- **Bomparda E. , Maa Y. , Napolia R. , Abrateb G., Ragazzib E. (2007)** *“The impacts of price responsiveness on strategic equilibrium in competitive electricity markets”* [14]

Uno de los aspectos más importantes que puede afectar el funcionamiento del mercado está relacionado con la sensibilidad de la demanda al precio. Esta situación puede impactar grandemente el desarrollo del mercado causando baja eficiencia, altos precios y una distribución desproporcionada de los excedentes. La estructura del mercado eléctrico es oligopolista por naturaleza; los productores pueden ofrecer precios más altos que sus costos marginales, ocasionando desviaciones de lo que es un mercado competitivo. La posibilidad de un mercado de este tipo se logra en la presencia de demandas que respondan al precio.

Los autores proponen un modelo para evaluar el papel de la demanda elástica y atenuar los efectos del comportamiento aislado de agentes del mercado. Se modela el suministro de energía bajo un esquema basado en conjeturas que permite la incorporación de cambios externos en la elasticidad de la demanda y bajo diferentes niveles de competencia. El impacto de la receptividad de la demanda sobre el desarrollo del mercado son evaluadas a través de un conjunto de índices propuestos, éstos fueron aplicados a un modelo del mercado italiano.

Programación Binivel

- **Moitre D., Sauchelli V., García G., (2005)** “*Optimización Dinámica Binivel de Centrales Hidroeléctricas de Bombeo en un Pool Competitivo*” [15], [16], [17],

Plantean un modelo técnico económico de centrales hidroeléctricas de bombeo para la programación de la operación diaria, como un problema de optimización dinámica binivel que maximiza los beneficios del agente del pool (Objetivo de la central de bombeo) y minimiza los costos variables de operación del pool (Objetivo del operador del pool competitivo)

$$\begin{aligned} \max \sum_{j \in K} B_j(PG_j, PB_j) \\ \min \sum_{j \in K} \sum_{k \in T} C_j^k PT_j^k \end{aligned}$$

K : Etapas horarias de programación de la operación diaria.

G : Etapas de Generación

T : Conjunto de centrales térmicas

B_j : Beneficio de la central hidroeléctrica de bombeo en la hora $j \in K$ [\$/h]

PG_j : Potencia Generada por la central hidroeléctrica de bombeo en la hora $j \in G$, [MW]

PB_j : Potencia de bombeo consumida por la central hidroeléctrica de bombeo en la hora j [MW]

PT_j^k : Potencia activa de la central térmica $k \in T$ en la hora j [MW]

C_j^k : Costo variable de operación de la central térmica $k \in T$ en la hora j

Se plantean restricciones de capacidad de las plantas, de equilibrio, de volumen de embalse, cotas para el caudal, límites de generación.

- **Milles G. Nicolles. (1995)** “*Aluminum Production Modelling a Non-linear bilevel programming Approach*” [18]

Desarrolla un modelo de programación en dos niveles para la fundición de Aluminio, que representa la mayor producción del proceso. El modelo abarca todos los niveles de fundición del material. El problema presenta no linealidad con respecto a las variables y razones entre las restricciones debido a la relaciones fundamentales que se presenta en la naturaleza propia de la fundición de este elemento; lo que vuelve desalentador su solución, sin embargo, se hacen un número de simplificaciones, y se encuentra una rápida solución algorítmica al problema.

- **Brown G., Carlyle M., Diehl D., Kline J., Wood K. (2005)** “*A Two-Sided Optimization for Theater Ballistic Missile Defense*” [19]

Describen un modelo de optimización en dos niveles para la ubicación de misiles interceptores que contrarrestan el ataque del enemigo. En el modelo básico el defensor ubica la plataforma de defensa del misil de tal forma que se minimice el peor de los daños que el atacante puede causar, se asume que el atacante estará a la defensiva anticipando sus decisiones y que ambos tienen completa información sobre el objetivo para decidir el punto de ataque, y la capacidad del armamento del enemigo. Otra función del modelo es investigar el valor de la confidencialidad restringiendo el acceso de información del atacante o del defensor. Es posible evaluar en pocos segundos y con la ayuda de un computador cambios en las acciones de los atacantes y planear en segundos la defensa óptima.

- **Castelli, Lorenzo,; Longo G., Pesenti R., Ukovich W., (2004)** “*Two-player noncooperative games over a freight transportation network*” [20]

Consideran el juego entre dos jugadores que interactúan en la misma red de transporte. El primer jugador pretende minimizar los costos de transporte, mientras que el segundo jugador maximiza su utilidad, que es proporcional al flujo de pasajeros a través de los arcos bajo su control. Se utiliza programación binivel y se introducen las condiciones de existencia y propiedades de los puntos de equilibrio, se propone un algoritmo para encontrar una solución local óptima. Se presenta, además una aplicación del modelo en un sistema real que considera camiones viajando por Europa desde un país del Oriente medio.

- **Dempe S., Kalashnikov V.; Rios-Mercado, R.Z. (2005)** “*Discrete bilevel programming: Application to a natural gas cash-out problem*” [21]

Presentan un esquema matemático para el problema de minimización del costo de multas de exportadores de gas natural. El problema es modelado como un problema de programación binivel entera mixta, con una variable booleana en el nivel más bajo. Este tipo de problemas es difícil de resolver, para obtener un problema más manejable la variable booleana se mueve del nivel más bajo al alto. Las implicaciones de este cambio están aún siendo estudiadas rigurosamente. El resultado en el nivel bajo se convierte en un problema de transporte generalizado. Los autores presentan también la formulación de las condiciones que garantizan la existencia de una solución óptima.

Capítulo 4

Diseño del Modelo

4.1 Objetivos

4.1.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de optimización binivel aplicado al sector eléctrico que permita maximizar los beneficios individuales de cada generador conectado al sistema a la vez que se maximizan las utilidades de los comercializadores abastecidos por éste, teniendo en cuenta las restricciones de capacidad de las unidades generadoras y la demanda de energía de los usuarios no regulados que se deben suplir.

4.1.2 Objetivos Específicos

- Obtener una solución factible al modelo planteado haciendo uso de la herramienta informática GAMS.
- Aplicar la metodología estudiada a una cadena de suministro de energía eléctrica específica para evaluar y validar la eficiencia de la técnica con la ayuda de las herramientas de programación planteadas.
- Comparar resultados obtenidos con otro método o con valores anteriores para medir la bondad del método binivel en el sector eléctrico.

4.2 Diseño Metodológico

4.2.1 Tipo de Estudio

El proyecto es llevado a cabo siguiendo tres fases, la primera es la fase exploratoria donde se busca la información necesaria para entender el contexto que enmarca el problema planteado, comportamiento del mercado eléctrico, metodologías utilizadas para analizarlo, trabajos realizados en equilibrios de

mercado, nuevas herramientas que se puedan implementar en optimización, procesos informáticos aplicados, etc.

La segunda fase es descriptiva, en ésta se analizan las variables que intervienen en la cadena de suministro de energía en el mercado no regulado, las características de los agentes que en él participan, la metodología de optimización a utilizar, las diferentes formas de darle solución al problema de optimización.

La última fase es la analítica, en ésta se aplicará la metodología de optimización binivel para encontrarle solución al modelo planteado utilizando herramientas computacionales a través de lenguajes de modelación y programación.

4.2.2 Metodología

La metodología seguida para la realización del presente trabajo es la siguiente:

1. **Revisión del estado del arte.** En esta parte se realizará una revisión bibliográfica acerca de los diferentes temas relacionados con la investigación: Funcionamiento del mercado eléctrico colombiano, cadenas de suministro de electricidad, modelos de equilibrio en mercados eléctricos, bases teóricas de la programación multinivel y binivel, sus áreas de aplicación, algoritmos implementados en los **PBL**, resolución de **PBL** mediante algoritmos genéticos.
2. **Planteamiento del modelo y aplicación de la programación binivel.** Se planteará un modelo económico teniendo en cuenta el comportamiento lógico de los agentes que hacen parte en forma directa del proceso de compra y venta de energía, a saber, generadores, comercializadores y usuarios no regulados frente a sus objetivos, los dos primeros tienen como fin maximizar sus utilidades y/o ingresos, el tercero necesita suplir una demanda a precios razonables. Teniendo en cuenta que en el mercado no regulado los precios son pactados libremente entre comercializador y usuario este último tiene la opción en caso de no poder negociar, escoger al proveedor que le plantee mejores precios.

En esta parte se buscará tomar la mejor decisión para los agentes involucrados en el problema de tal forma que se satisfagan sus expectativas; se presentarán diferentes opciones para cada usuario, se examinarán los resultados obtenidos para cada generador y comercializador para analizar las diferentes situaciones que se pueden dar en el proceso.

3. **Validación del Modelo y análisis de los resultados** Se utilizarán herramientas computacionales, a través de lenguajes de modelación y programación para evaluar el comportamiento de la metodología de optimización binivel en el sector eléctrico mediante la comparación de resultados obtenidos con otro método o en situaciones reales anteriores.

En este punto, se mostrarán las evidencias que permitan determinar si la modelación hecha para este estudio es válida y aplicable a situaciones

reales, si las herramientas computacionales dan una solución óptima al problema, si es posible implementarlas en la práctica, se establecerán conclusiones, recomendaciones y temas para futuros estudios.

4.3 Descripción del Modelo

En la cadena de suministro de energía planteada intervienen m generadores, n comercializadores y r usuarios no regulados.

El generador i , $i = 1, \dots, m$ debe vender a cada comercializador j , $j = 1, \dots, n$ una cantidad de energía X_{ij} a un precio C_{ij} de tal manera que maximice sus ingresos teniendo en cuenta sus restricciones de capacidad.

El comercializador j , $j = 1, \dots, n$ vende a cada usuario no regulado k , $k = 1, \dots, r$ una cantidad de energía Y_{jk} a un precio P_{jk} de tal manera que maximice sus utilidades teniendo en cuenta que debe suplir una demanda, y minimizar sus pérdidas.

En el problema de programación binivel planteado se tienen dos niveles de decisión, el nivel alto (Donde hay un líder) en este caso el generador y el nivel bajo (Donde hay un seguidor o seguidores), los comercializadores. El generador i controla el vector de decisión $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{in})$ el comercializador j controla el vector de decisión $Y_j = (Y_{j1}, \dots, Y_{jr})$. El sistema global está sujeto a un conjunto de restricciones que determinan la región factible $S \subset E^{n+r}$ para X_i y Y_j .

El generador y los comercializadores juegan “*El juego de duopolio de Stackelberg*” donde la idea básica es la siguiente: El generador escoge el vector de decisión X_i que maximice sus *Ingresos*. El comercializador teniendo en cuenta la decisión del líder escoge su vector de decisión Y_j que maximice su *Utilidad*.

El problema se puede formular de la siguiente manera:

Para el generador i (El líder)

$$\max \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

Para los n comercializadores (Los seguidores)

$$\max \left(\sum_{k=1}^r P_{jk} Y_{jk} - \sum_{i=1}^m C_{ij} X_{ij} \right) \quad \text{Para todo } j = 1, \dots, n$$

Sujeto a:

Restricción de capacidad: (m restricciones)

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq d_i \quad \text{Para todo } i$$

Restricción de equilibrio: (n restricciones)

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = \sum_{k=1}^r Y_{jk} \quad \text{Para todo } j = 1, \dots, n$$

Restricciones de demanda:(r restricciones)

$$\sum_{j=1}^n Y_{jk} = S_k$$

Restricciones de seguridad de no pérdidas:(n restricciones)

$$\sum_{k=1}^r P_{jk} Y_{jk} - \sum_{i=1}^m C_{ij} X_{ij} \geq 0 \text{ Para todo } j = 1, \dots, n$$

Restricciones de no negatividad:

$$X_{ij}, Y_{jk} \geq 0$$

4.4 Fuentes de Información

Se pretende con este proyecto realizar dos tipos de aporte, académico e informático. Teniendo en cuenta la parte académica se consultaron fuentes de información primaria, compuestas de artículos científicos publicados en revistas de investigación, relacionados con los temas de optimización binivel y sus técnicas de solución, equilibrio en mercados eléctricos y su análisis teniendo en cuenta teoría de juegos, comportamiento del mercado eléctrico colombiano y de otros países, algoritmos genéticos y sus aplicaciones; libros especializados en temas de Teoría de Juegos, Optimización multiobjetivo; Páginas Web específicas (Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)), Para llegar a estas fuentes se exploraron fuentes secundarias como la base de datos de la Universidad del Norte, Buscadores especializados de Internet, Páginas Web de autores relacionados, referencias generales.

Para la parte informática, además de las fuentes de información primarias y secundarias se creará una base de datos simulada que contenga los parámetros del modelo, los asociados al generador (Capacidades máxima y mínima, precios de venta de energía), para el comercializador (Energía a suplir, para lo cual se tendrá en cuenta un modelo de proyección de demanda de energía, precios de venta de energía); lenguajes de programación.

4.5 Resultados Esperados.

Con la realización de este trabajo se busca crear una metodología para la toma de decisiones en el sector eléctrico, que permita encontrar el mejor escenario de decisión de los agentes que participan en el mercado de energía no regulado.

Los resultados se pueden numerar de la siguiente manera:

- Modelo matemático que permita a los generadores que hacen parte del mercado eléctrico tomar la mejor decisión en cuanto a las cantidades de

energía vendidas a cada comercializador de tal manera que se maximicen sus ingresos a la vez que se maximicen las utilidades del comercializador teniendo en cuenta la demanda a suplir y las restricciones del modelo.

- Encontrar la solución al modelo planteado de diferentes maneras, utilizando GAMS a través del solver SNOP que supera las limitaciones matemáticas de la metodología de optimización binivel, y utilizando algoritmos genéticos a través del SPEA, para ello se elabora el código que ejecuta adecuadamente las acciones definidas por la metodología escogida.
- Presentación de los resultados obtenidos y recomendaciones para futuras investigaciones.

4.6 Alcance y Limitaciones

Del análisis de las fuentes de información primaria y secundaria se observó, que se han utilizado conceptos de teoría de juegos como los modelos de Cournot¹ y Bertrand² en la búsqueda del equilibrio de mercados eléctricos, aunque la metodología de optimización binivel se basa en el juego de duopolio de Stackelberg³, este no ha sido aplicado en este tipo de mercados. Se presenta entonces la limitación de comprobar que la metodología de optimización aplicada y la herramienta informática creada para la búsqueda de la solución al problema de equilibrio en mercados eléctricos no regulados sea adecuada en este campo, se buscará la forma de ejecutar la herramienta de solución propuesta basándose en suposiciones válidas y valores simulados.

Se tratará de buscar acceso a un escenario real que satisfaga las condiciones supuestas para validar la utilidad de la herramienta.

¹El modelo Cournot es un juego de un solo período, en el cual dos empresas producen un bien no diferenciado con una curva de demanda conocida. Las dos firmas compiten por elegir sus niveles respectivos de producción simultáneamente. Cada una elige Q suponiendo que la producción de su oponente es un dato fijo.

²Dos firmas venden un bien homogéneo y han de elegir el nivel óptimo de precios (P_1 y P_2).

³En un modelo Stackelberg, el equilibrio se alcanza cuando el jugador 1, adelantándose a su competidor, amplía la producción y se asegura mayores beneficios. De ahí el término “la ventaja de ser el primero”. El jugador 2 se ve obligado a reducir la producción, dado que el líder (Jugador 1) ya ha producido una gran cantidad (cuando uno produce más, el otro reacciona produciendo menos).

Capítulo 5

Solución del Modelo de Optimización

Hoy día los mercados de energía eléctrica están experimentando grandes cambios debido a la competencia que se presenta en la etapa de generación de la energía, lo que conlleva a crear mercados más equilibrados que benefician a todos los agentes que hacen parte del mismo. Para analizar el comportamiento de este mercado se hace necesario desarrollar modelos técnicos, económicos o técnico-económicos.

En este trabajo se desea plantear un modelo económico que busca encontrar la mejor decisión para un generador en términos de maximizar ingresos frente a la presencia de muchos agentes comercializadores que desean optimizar sus ganancias que a la vez dependen de las necesidades de los usuarios. El modelo es planteado como un problema de optimización binivel el cual maximiza los ingresos del generador, sujeto a la restricción de maximizar las ganancias de los comercializadores que suple.

Para aplicar la programación binivel al problema de la cadena de suministro de energía se expresó el problema inicial de la forma:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \\ & \max \left(\sum_{k=1}^r P_{jk} Y_{jk} - \sum_{i=1}^m C_{ij} X_{ij} \right) \quad \text{Para todo } j = 1, \dots, k \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} g_i(\mathbf{x}) &= \left(\sum_{j=1}^n X_{ij} - d_i \right) \quad i = 1, \dots, m \\ g_{m+j}(\mathbf{x}) &= \left(\sum_{i=1}^m X_{ij} - \sum_{k=1}^r Y_{jk} \right) \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

$$g_{m+n+k}(\mathbf{x}) = \left(\sum_{j=1}^n Y_{jk} - S_k \right) \quad k = 1, \dots, r$$

$$g_{m+n+k+j}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^r P_{jk} Y_{jk} - \sum_{i=1}^m C_{ij} X_{ij} \quad j = 1, \dots, n$$

De acuerdo con las condiciones de Karush Kunh Tucker (**KKT**) el problema a resolver es el siguiente:

$$\max \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

Sujeto a:

$$\nabla_l f_i(\mathbf{x}) - \sum_{i=1}^m w_i \nabla_l g_i(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^n w_{m+j} \nabla_l g_{m+j}(\mathbf{x}) - \sum_{k=1}^r w_{m+n+k} \nabla_l g_{m+n+k}(\mathbf{x}) = 0$$

$$w_i g_i(\mathbf{x}) = 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$w_{m+j} g_{m+j}(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$w_{m+n+k} g_{m+n+k}(\mathbf{x}) = 0 \quad k = 1, \dots, r$$

$$w_{m+n+k+j} g_{m+n+k+j}(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$g_{m+j}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$g_{m+n+k}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad k = 1, \dots, r$$

$$g_{m+n+k+j}(\mathbf{x}) \leq 0$$

$$\mathbf{w}_t \geq \mathbf{0} \quad t = 1, \dots, m + 2n + r,$$

∇_l es el gradiente con respecto a x_l (de las variables controladas por el subnivel i)

Para evaluar la bondad de esta metodología se consideró un sistema compuesto por 5 generadores, 6 comercializadores y 4 usuarios no regulados. La información necesaria se resume en las siguientes Tablas.

Generador	Potencia (MW)
G1	302
G2	411
G3	447
G4	314
G5	877

Tabla 5.1: Capacidad de Generación

Usuario	Demanda (MW)
U1	250
U2	315
U3	325
U4	200

Tabla 5.2: Demanda de los usuarios

Generadores	Comercializadores					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
G1	94,8	102	93,6	87,0	93,6	93,6
G2	93,6	91,2	97,8	88,8	94,2	91,2
G3	87,6	94,8	90,0	87,6	95,4	97,8
G4	94,8	97,2	97,2	103,8	96,6	88,8
G5	95,4	89,4	89,4	90,0	96,6	97,2

Tabla 5.3: Precio de Venta de Energía de Generadores a Comercializadores

Comercializadores	Usuarios No regulados			
	U1	U2	U3	U4
C1	158	170	156	145
C2	156	152	163	148
C3	146	158	150	146
C4	158	162	162	173
C5	159	156	149	150
C6	156	157	159	161

Tabla 5.4: Precio de Venta de Energía de Comercializadores a Usuarios

En el modelo planteado las potencias de generación son las variables de decisión del generador considerado ($X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}$), el precio de venta de cada generador i a los comercializadores j (C_{ij}) se considera fijo. Las variables de decisión del comercializador j es la potencia que vende a cada usuario k (Y_{jk} $j = 1, \dots, 6$ y $k = 1, \dots, 4$) El precio de venta a éstos (P_{jk}) se considera también fijo.

Las condiciones de **KKT** generan un total de 69 variables, 54 variables de decisión y 15 multiplicadores de Kunt Tucker; 34 restricciones (24 de gradiente, 5 de equilibrio, 5 de demanda, basadas en las condiciones de primer orden de Kunt Tucker)

El método fue implementado con la ayuda de **GAMS** (General Algebraic Modeling System) [22] un Software de modelación algebraica para resolver problemas de optimización utilizando el solver CONOPT¹. La solución al problema se resume en las tablas siguientes:

¹CONOPT está basado en el método del gradiente reducido (**GRG**). Utiliza técnicas

X_{ij} Potencia suministrada por el generador i al comercializador j					
X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
0	17,94	0	283,604	0	0,456
X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}
73,869	48,589	29,224	47,672	24,462	24,462
X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}
19,25	45,839	26,474	44,922	21,712	21,712
X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	X_{45}	X_{46}
19,25	45,839	26,474	44,922	21,712	21,712
X_{51}	X_{52}	X_{53}	X_{54}	X_{55}	X_{56}
19,25	45,839	26,474	44,922	21,712	21,712

Tabla 5.5: Potencia suministrada por los Generadores a los Comercializadores

Y_{ij} Potencia vendida por el comercializador j al usuario k			
Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}
37,089	37,089	37,089	20,352
Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}
183,046	10,5	10,5	0
Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}
29,865	29,865	48,913	0
Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}
0	237,546	228,498	0
Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{54}
0	0	0	89,596
Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	Y_{64}
0	0	0	90,052

Tabla 5.6: Potencia vendida por los Comercializadores a los Usuarios

Los valores de las funciones objetivo de los agentes participantes son:

matriciales que permite darle solución a modelos complejos, Establece diferentes tolerancias y mediante rutinas de reinversión encuentra una buena aproximación al óptimo global.

Generador	\$
1	26546, 11
2	22972, 09
3	16544, 42
4	17542, 03
5	16679, 39
Comercializador	\$/h
1	8640, 33
2	12509, 86
3	6235, 09
4	33951, 26
5	4869, 00
6	6128, 03

Tabla 5.7: Valores de las Funciones Objetivos

En ciertos mercados competitivos de compra y venta de bienes y/o servicios la cooperación es en muchos casos la mejor opción para que los participantes encuentren una solución óptima general; en el mercado de energía eléctrica es imposible actuar aisladamente, se hace necesario el análisis de diferentes tipos de acciones que beneficien a todos los agentes participantes.

Los siguientes son los resultados que se obtendrían si cada participante en el mercado buscara su propio beneficio, se ve claramente que estas soluciones no son válidas en este tipo de mercados, porque anularía en algunos casos la participación total de un agente.

Utilidades máximas de comercializadores					
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
70269	0	0	0	0	0
0	60406	2303	3857	0	0
0	1264	37215	0	0	0
0	336	5056	50953	0	0
0	2106	8790	10565	63989	0
2472	0	6706	6143	0	70001

Tabla 5.8: Utilidad Máxima de cada comercializador

Los ingresos de los generadores en cada caso están dados por:

Generador	Ingresos de generadores					
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1	28630	30804	28267	27502	28267	28267
2	1829	37656	40170	0	38716	2462
3	38055	5108	6110	10034	6010	43717
4	29666	30497	30938	31211	30332	27883
5	1876	836	49	33426	0	0

Tabla 5.9: Ingresos para cada generador al maximizar la utilidad del comercializador

La solución encontrada utilizando la técnica de programación binivel da una buena respuesta a un mercado de competencia donde es imposible actuar aisladamente y las decisiones que tomen los agentes que están en niveles diferentes influyen en gran manera en la consecución de los objetivos particulares.

Capítulo 6

Conclusiones

Teniendo en cuenta que el mercado de clientes no regulados es un sector donde la competencia en la etapa de la generación tiene un alto potencial debido a la existencia de un gran número de empresas compitiendo, se hace necesario la aplicación de metodologías para la creación de modelos de optimización con su correspondiente solución matemática o algorítmica que resuelva el problema y encuentre soluciones óptimas para el sistema y/o para los agentes.

La optimización binivel es una herramienta de aplicación muy importante, que puede ser implementada en aquellas áreas donde estén presentes estructuras jerárquicas, ya sea, en cuanto a organización, importancia de actividades u orden de ejecución de las mismas.

En este trabajo la metodología se implementó en la modelación de un problema económico donde la jerarquía se mira en términos del orden en que se realizan las actividades, se encontró una solución al problema de determinar las cantidades de compra y venta de energía considerando los eslabones Generador-Comercializador-Usuario.

Es importante tener en cuenta que en la cadena de abastecimiento de energía participan cuatro tipos de agentes (Los pasivos: Trasmisores y distribuidores, los activos: Generadores y comercializadores), que pueden participar en la modelización del comportamiento del mercado, puesto que sus capacidades y limitaciones influyen en el equilibrio del mismo.

Para futuras aplicaciones de esta metodología en el sector eléctrico se ampliará el sistema considerado, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Mercado de usuarios regulados.
- Características tecnoeconómicas de los distintos agentes participantes.
- Modelos de programación en la operación de sistemas térmicos y/o hídricos que consideren la minimización de los costos de operación y la maximización de utilidades de los agentes activos del sistema.
- Implementar algoritmos genéticos para la solución del problema.

Bibliografía

- [1] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Tutorial On Game Theory Applications in Electric Power Markets", Winter Meeting, New York, 1999.
- [2] Osborne, Martin J. An introduction to game theory, Nueva York : Oxford University, 2004
- [3] Klemperer, Paul and Margaret Meyer. "Price Competition vs. Quantity Competition: the Role of Uncertainty". The RAND Journal of Economics. Vol 17 n.4, pag 622, 1986
- [4] Klemperer, Paul and Margaret Meyer (1989). "Supply Function Equilibria in Oligopoly under
- [5] www.creg.gov.co "Página de la Comisión de regulación de Energía y Gas"
- [6] UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, "Una Visión al Mercado Eléctrico Colombiano" Julio de 2004.
- [7] Bialas W.F., and Karwan M.H. . "Two Level Lineal Programming problem" Management Science, Vol. 30, No. 8 August 1984.
- [8] U.P. Wen and S.F. Lin, "Finding an Efficient Solution to Linear Bilevel Programming Problem: An Effective Approach," Journal of Global Optimization, Vol.8, pp.295-306, (1996). (SCI)
- [9] J.F.Bard and J. E Falk (1982) "An explicit Solution to the Multilevel programming Problem. Comput. Opns Res 9, 77-100.
- [10] Green R., Newbery D. "Competition, contracts and entry in the electricity spot market" RAND Journal of economics, Vol 29, No 4, Pag. 726-749, 1998
- [11] Anderson, Eddiea J. "Optimal offer construction in electricity markets Source" Mathematics of Operations Research, Vol 27, No 1, February, 2002, p 82-100, Operations Res. and the Management Science
- [12] Bessembinder H. , Lemmon M. "Equilibrium Pricing and Optimal Hedging In Electricity Forward Markets", The Journal of finance, Vol 57, No 3, Junio 2002

-
- [13] Ashkan R. Kiana, , and Jose B. Cruz, Jr.b, "Bidding strategies in dynamic electricity markets" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pp.15-21, Feb. 2001.
- [14] Bomparda E. , Maa Y. , Napolia R. , Abrateb G., Ragazzib E. "The impacts of price responsiveness on strategic equilibrium in competitive electricity markets" International Journal of Electrical Power & Energy Systems Vol 29, June 2007, Pages 397-407
- [15] Moitre D., Sauchelli V., García G., (2005) "Optimización Dinámica Binivel de Centrales Hidroeléctricas de Bombeo en un Pool Competitivo" Revista IEEE Latino Americana, Abril de 2005
- [16] Moitre, D., Sauchelli, V., y García, G, Optimización Dinámica Binivel de Centrales Hidroeléctricas de bombeo en un Pool Competitivo - Parte I: Modelo y Algoritmo. Revista IEEE América Latina. v.3, n.2, p.62 - 67, 2005a.
- [17] Moitre, D., Sauchelli, V., y García, G, Optimización Dinámica Binivel de Centrales Hidroeléctricas de Bombeo en un Pool Competitivo – Parte II: Casos de Estudio. Revista IEEE América Latina. , v.3, n.2, p.68 - 74, 2005b.
- [18] Milles G. Nicolles."Aluminum Production Modelling a Nonlinear bilevel programming Approach", Vol. 43, No. 2, abril de 1995
- [19] Brown G., Carlyle M., Diehl D., Kline J., Wood K. (2005) "A Two-Sided Optimization for Theater Ballistic Missile Defense" OPERATIONS RESEARCH Vol. 53, No. 5, September–October 2005, pp. 745–763
- [20] Castelli, L., Longo G., Pesenti R., Ukovich W., "Two-player noncooperative games over a freight transportation network" Transportation Science, Vol 38, No 2, May, 2004, p 149-159
- [21] Dempe S., Kalashnikov V.; Rios-Mercado, R.Z. "Discrete bilevel programming: Application to a natural gas cash-out problem" Journal of Operational Research, Vol 166, No 2, 16 Oct. 2005, Pag 469-88
- [22] www.gams.com
- [23] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Tutorial On Game Theory Applications in Electric Power Markets", Winter Meeting, New York, 1999.